

определении кольцевых напряжений, возникающих в отремонтированном муфтой участке трубопровода:

$$\sigma_{\kappa\iota} = \frac{pR_{cp}}{\delta_m + \delta_{mp}} - \frac{(R_{cp} - R_{mp})\delta_{mp}E}{2R_{cp}R_{mp}},$$

где  $p$  – давление перекачиваемого продукта, МПа;

$R_{cp}$  – средний радиус кривизны поверхности контакта трубопровода с муфтой после создания внутреннего давления в трубопроводе, м;

$\delta_m, \delta_{mp}$  – толщина стенки муфты и трубы, м;

$E$  – модуль упругости материала трубы и муфты, МПа.

Первое слагаемое правой части формулы отражает безмоментные кольцевые напряжения в трубопроводе и муфте, второе – напряжения изгиба стенки трубопровода, а знак «минус» указывает на сжатие стенки трубопровода в дефектном месте за счет изгиба.

**УДК 682.476**

## **ПРИМЕНЕНИЕ НОВЫХ МАТЕРИАЛОВ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ НАДЕЖНОСТИ РАБОТЫ НАСОСОВ**

**В. А. Фруцкий, А. Г. Кульбей**

*УО «Полоцкий государственный университет», Новополоцк, Беларусь*

В последние годы в отрасли ведутся интенсивные исследования в области трибоматериаловедения, касающейся разработки категории композиционных материалов, позволяющих воспринимать значительные нагрузки, как в радиальном, так и в касательном направлении для обеспечения надежной работы подшипников насосов. При этом предполагается, что пара трения должна работать в жестком режиме при недостаточной смазке и высокой запыленности рабочего пространства.

Известными антифрикционными материалами являются сплавы на основе меди [1]. Согласно экспериментальным данным, лучше всего зарекомендовали себя эти материалы в условиях переменных динамических нагрузок. Такие нагрузки присутствуют в узлах возвратно-поступательного движения, таких, например, как втулки кривошипно-шатунных механизмов (КШМ) различного рода насосов и др.

В настоящей работе была предпринята попытка на основе адекватно смоделированных условий работы трибосопряжений различных кривошип-

но-шатунных механизмов и информации о поведении того или иного материала дать рекомендации о возможности его использования в данном узле.

Для определения и сопоставления технологических свойств использовали порошки бронз Бр.ОЦС 5-5-5, Бр.ОФ10-1, Бр.АЖ9-4.

Таблица 1

Технологические свойства порошков бронз

Марка порошка	Коэффициент текучности $K_m$	Насыпная плотность $C_{нас}$ , г/см <sup>3</sup>	Пикнометрическая плотность $C_{пик}$ , г/см <sup>3</sup>
Бр.ОЦС 5-5-5	1,47	3,366	7,743
Бр.ОФ10-1	1,86	3,175	7,558
Бр.АЖ9-4	4,37	1,680	5,776

Поскольку Беларусь не располагает собственной сырьевой базой, в качестве основы синтезированного материала обратили внимание на отходы металлообработки, в избытке имеющиеся на предприятиях республики. В числе прочих проводились исследования материалов системы СЧ+Cu+В. Однако матрицы на основе СЧ не обладают достаточными антифрикционными свойствами [2], также известна [3] их недостаточная работоспособность в тяжелых условиях эксплуатации.

Одним из способов улучшения триботехнических свойств многокомпонентных материалов является подбор оптимального соотношения легирующих элементов. Так, согласно рекомендациям [4, 5] были выбраны медь и бор. Их соотношению и взаимному расположению для получения максимально эффективных эксплуатационных свойств посвящено исследование.

Цель работы: синтезировать материал системы Сч + Cu + В с высокими трибологическими свойствами и оптимизировать метод нанесения материала на рабочую поверхность пары трения.

Методики экспериментов: по критериям минимизации затрат на материал, изготовление, нанесение покрытия были исследованы материалы, основой которого является стружка, отсеиваемая из отходов металлообработки (СЧ 20) при минимальном количестве меди и бора.

При анализе трибосопряжения были выявлены следующие факты:

- а) трибосопряжение работает под действием переменной нагрузки;
- б) втулка как опора вала воспринимает нагрузки непосредственно с рабочего органа машины;
- в) смазка осуществляется посредством закачки смазочного материала под давлением через отверстия смазочных пазов (каналов);

г) узел работает в условиях загрязненности смазочного материала пылью и песком с содержанием кварца 80% и корунда 20% твердостью 18 и 23 ГПа соответственно;

д) тип трения трибопары – граничное трение.

В качестве образцов вала применяли диски, вырезанные из коленчатого вала. В качестве контртела использовали серийные втулки, из которых вырезали сегмент размером 12x12 мм и закрепляли его в специальном приспособлении. Для моделирования реальных условий работы диски изготавливали с эксцентриситетом для возможности секторного нагружения вала. Максимально допускаемое давление на узел скольжения было определено по условию прочности материала вкладыша [6]. Расчет нагрузок на пару вал-вкладыш проводился по контурным давлениям. За максимальное давление принимали давление на 8% – 10% ниже предела текучести бронзы, равное 7,2 МПа. Смазывание осуществляли до начала испытания смазкой «Солидол» ГОСТ 4366-76. С целью ужесточения режимов испытания в смазку вводили до 10% объема абразивные частицы размером менее 30 мкм  $\text{SiO}_2$  и  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Эти частицы постоянно имеются на местах эксплуатации втулок.

Перестановкой валов различного конструкционного исполнения добивались возможности реализации разных режимов нагружения. Это обеспечивает применение установки для имитации работы различных механизмов (кривошипно-шатунных и эксцентриковых).

В качестве исследуемых применялись образцы с нанесенным слоем из материала системы  $\text{Сч} + \text{Cu} + \text{В}$ , где варьировалось содержание меди и бора.

Легирование проводилось динамическим методом в течение 2 – 4 часов по методикам [7].

Данные по износу материалов при различных режимах трения приведены в табл. 2, 3.

Таблица 2

Износостойкость вкладышей при циклической нагрузке

Материал	Износ, мг/м, на пути трения $L$ , м			Твердость НВ
	2000	4000	6000	
БрОФ 10-1	0,31	0,63	1,68	90
БрОЦС 5-5-5	0,8	1,0	1,4	60
БрАЖ 9-4	0,25	0,35	0,465	130

Таблица 3

Износ вкладышей образцов, мг\*Е<sup>-5</sup>

Материал	Путь трения, м			Твердость НВ
	2000	4000	6000	
БрОФ 10-1	1,6	1,65	1,7	90
БрОЦС 5-5-5	0,95	1,67	2,95	60
БрАЖ 9-4	0,25	1,05	1,65	130
Сч+Cu+В	0,23	0,35	0,465	90

Согласно трибоиспытаниям минимальный износ вкладыша и вала наблюдается у образцов Сч+Cu+В.

Измерение микротвердости фаз выявило следующие результаты (табл. 4).

Таблица 4

Микротвердость идентифицированных фаз, кгс/мм<sup>2</sup>

Фаза		
белая	серая	желтая
255,3	376,1	107,2
256,6	435,0	113,6
259,6	433,3	113,6
317,1	344,7	118,2
320,5	494,4	
	376,1	
	381,0	

С уверенностью можно выделить наличие медной фазы, бора и боридов в покрытии. Не обнаружено графитных включений, что связано с растворением графита расплавленными частицами и возможным его выгоранием. Такая гетерогенная структура и наличие пористости должны обеспечить увеличение износостойкости покрытия.

При исследованиях способов нанесения покрытия на подложку были выявлены следующие результаты:

- при наплавлении с оплавлением по обмазке: адгезия уменьшается, медь сильно выгорает;
- при наплавке порошковой смеси без оплавления: адгезия увеличивается, однако растет сегрегация наплавленного материала;
- при напылении: хорошая адгезия, незначительное выгорание легирующих элементов, сегрегация практически отсутствует.

Методом нанесения выбрали напыление. Согласно данным по износу покрытий (табл. 5) минимальный износ трибопары на этапе установившегося износа наблюдается у образцов с композиционной структурой.

Таблица 5

Износ вкладышей образцов  $\text{мг} \cdot \text{Е}^{-5}$

Материал	Путь трения, м			Твердость НВ
	2000	4000	6000	
БрОФ 10-1	1,6	1,65	1,7	90
БрОЦС 5-5-5	0,95	1,67	2,95	60
БрАЖ 9-4	0,25	1,05	1,65	130
Сч20	4,1	4,5	11,3	100
Сч+Cu+V	0,23	0,35	0,465	90

При анализе количественного состава легирующих элементов были сделаны следующие выводы: Оптимальным можно считать состав, содержащий бора – 1,8%, меди – 18%, что подтверждается проведенными трибоиспытаниями (табл. 6).

Таблица 6

Сопоставительный анализ влияния элемента на износ трибосопряжения

Содержание элементов, масс.%, В	Содержание элементов, масс.%, Cu	Износ вала, $\text{мг/м} \cdot 10$	Износ вкладыша, $\text{мг/м}$
3	25	14,6	1,95
3	10	5,45	2,11
1	25	37,5	2,24
1	10	9,26	1,89
1,8	18	0,849	1,7

Изучаемые гетерогенные покрытия содержат фазы, выполняющие различные функции:

- перлитная матрица – армирующий каркас;
- возможные графитные включения – антифрикционные свойства материала;
- бориды – армирующий каркас, образование  $\text{В}_2\text{О}_3$  при больших давлениях, возможность избирательного переноса при восстановлении оксидов меди и железа;
- медь – увеличивает теплопроводность, прирабатываемость, антифрикционные свойства, снижение твердости материала в целом;
- покрытия системы Сч + Cu + В хорошо работают при переменных нагрузках. Возможные причины – более высокая жесткость матри-

цы и образование вторичных структур оксидного типа на основе меди и бора. Чем выше твердость сплава, тем лучше сплав работает при переменных нагрузках;

– бористые сплавы склонны к образованию  $B_2O_3$  при высоких контактных давлениях, что позволяет минимизировать износ пары трения при недостаточной смазке.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Войнов, Б.А. Износостойкие сплавы и покрытия / Б.А. Войнов. – М.: Машиностроение, 1989. – 120 с.
2. Furness, Justin. Steels. Alloy Steels [Электрон. ресурс] / Justin Furness // AzoM. The Institute of Materials. – Режим доступа: [www.azom.com](http://www.azom.com).
3. Зуев, А.А. Оценка триботехнических характеристик материалов по удельной тепловой мощности трения / А.А. Зуев // Машиностр. материалы. – 1999. – № 12. – С. 45 – 48.
4. Медь в черных металлах / под ред. И. Ле Мэя и Л.М.-Д. Шетки; пер. с англ., под ред. О.А. Банных. – М.: Металлургия, 1988. – 312 с.
5. Product Areas [Электрон. ресурс]: Welcome to the Future of Farming / Kverneland Group. – Режим доступа: [www.kvernelandgroup.com](http://www.kvernelandgroup.com).
6. Справочник по металлам и сплавам [Электрон. ресурс] / под ред. д.т.н., проф. Ю.П. Солнцева. – Режим доступа: <http://www.npomis.com>.
7. Штемпель, О.П. Интенсификация диффузионного легирования металлических порошков для защитных покрытий в подвижных порошковых смесях: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.01 / О.П. Штемпель. – Новополоцк, ПГУ, 2003. – 23 с.